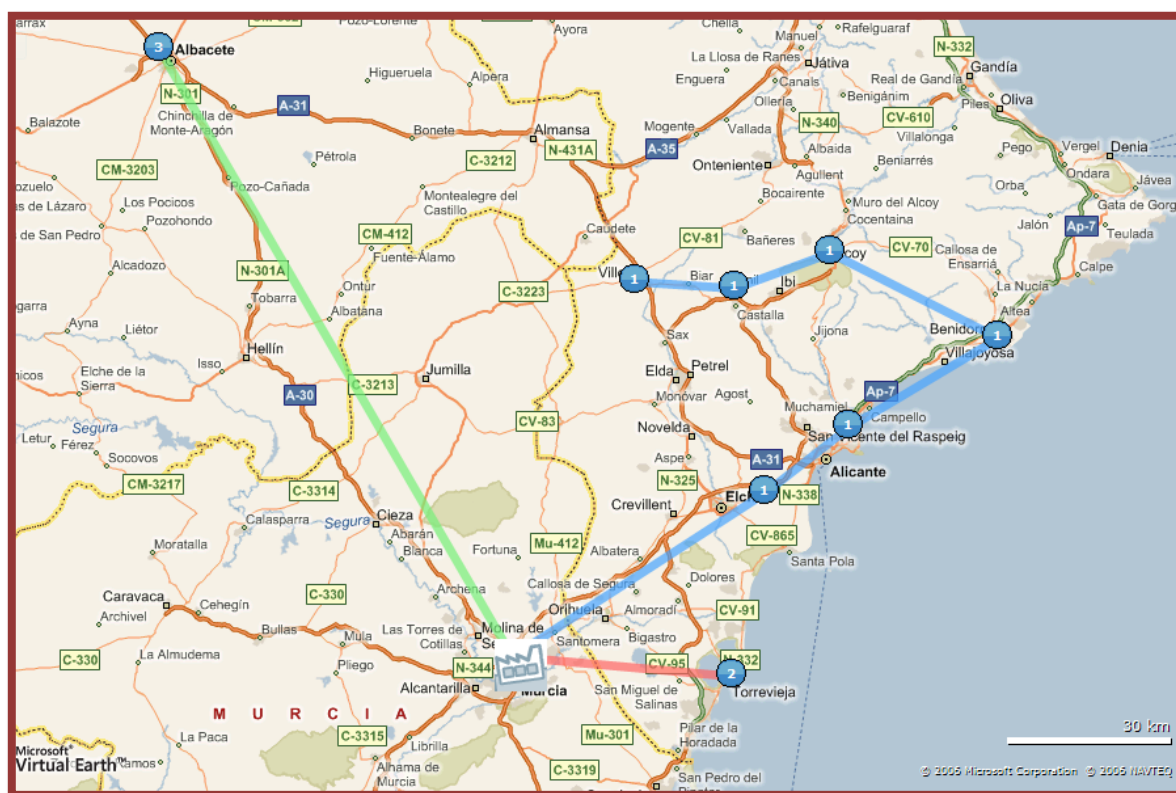


2017

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA DE RUTEO ABIERTO (OVRP)



PROYECTO



Universidad
Tecnológica
de Pereira

ANDERSON FELIPE TANGARIFE ÁLVAREZ
CÓD. 1.088.306.047

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PEREIRA
2017

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL PROBLEMA DE RUTEO ABIERTO
(OVRP)**

**ANDERSON FELIPE TANGARIFE ÁLVAREZ
CÓD. 1.088.306.047**

DIRECTORA:

PhD. ELIANA MIRLEDY TORO OCAMPO

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PEREIRA
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

PhD. ELIANA MIRLEDY TORO OCAMPO
DIRECTOR

Pereira, Colombia, Junio de 2017.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	9
2.1. BÚSQUEDA EN BIBLIOTECAS VIRTUALES	9
2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIANTES DEL PROBLEMA OVRP Y SUS MÉTODOS DE SOLUCIÓN	10
2.2.1. VARIANTES DEL OVRP	12
2.2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN	15
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	22
4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	25
5. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS	26
6. BIBLIOGRAFÍA	27

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de la investigación realizada.....	10
Figura 2. Esquema de clasificación del Problema de ruteo abierto.....	11
Figura 3. Esquema del OVRP con Cross-Docking (OVRPCD).....	12
Figura 4. Variantes relevantes adoptadas por el OVRP.....	15

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Definición de bibliotecas virtuales.....	10
Tabla 2. Clasificación de los artículos según variante del OVRP y métodos de solución.....	18

RESUMEN

En este documento se lleva a cabo una revisión bibliográfica del estado del arte del problema de ruteo abierto (OVRP; Open Vehicle Routing Problem). Se realiza la definición del problema, una clasificación de sus variantes y de los artículos e investigaciones publicadas en las bibliotecas virtuales: Scopus, Science Direct y Google Scholar acerca del tema. Además, se plantean los modelos de solución utilizados por los autores, las aplicaciones del estudio y las tendencias o futuras líneas de investigación.

El OVRP es un problema de planificación de rutas de transporte, generalización del *Problema del Agente Viajero* muy conocido y ampliamente estudiado, tiene como característica diferenciadora que los vehículos una vez finalizadas las entregas correspondientes no están obligados a regresar al punto de partida o depósito. La revisión observa lo publicado hasta mayo del año 2017.

Palabras clave: *Ruteo de vehículos, heurísticas, metaheurísticas, modelos de solución.*

ABSTRACT

This paper reviews the state of the art of the Open Vehicle Routing Problem (OVRP). The definition of the problem, a classification of its variants and articles and research published in the virtual libraries: Scopus, Science Direct and Google Scholar on the subject are made. In addition, the solution models used by the authors, study applications and trends or future lines of research are presented.

The OVRP is a problem of planning of transport routes, generalization of the Problem of the Travel Agent well known and widely studied, has as differentiating characteristic that the vehicles once finished the corresponding deliveries are not forced to return to the point of departure or deposit. The review looks at what was published until May 2017.

Keywords: *Vehicle routing, heuristics, metaheuristics, solution models.*

1. INTRODUCCIÓN

El ruteo abierto de vehículos (OVRP) es una ramificación del problema clásico de ruteo de vehículos (VRP), el cual ha recibido relativamente menos atención literaria.

El problema se describe por primera vez en [1] sin ningún intento de solución, pero el nuevo siglo trae consigo la aparición de nuevos estudios donde el OVRP empieza a tomar fuerza y a ser una característica fundamental en la logística de transporte en la industria.

En consecuencia en [2] se plantea el problema y sus características diferenciadoras del VRP y se establece el primer método heurístico para su solución. En [3] los autores establecen un algoritmo metaheurístico llamado **BoneRoute** para resolver el ruteo abierto óptimo de un sistema de entrega de periódicos, arrojando grandes resultados. A Partir de allí, se profundizo de gran manera en el OVRP, por ende existe una amplia información y literatura especializada en función de la evolución de este y sus variantes, se denota en [1], [3]-[61].

Durante el desarrollo de la revisión de los documentos, se tiene la oportunidad de encontrar una serie de enfoques y diferentes puntos de vista de los autores en pro de encontrar soluciones para el OVRP: en [5] se plantea un híbrido del problema puesto que los vehículos parten de varios depósitos y no están obligados a volver a estos, se resuelve aplicando una estrategia de búsqueda Tabú; [12] trata el problema de ruteo abierto de vehículos con ventanas de tiempo, los autores resuelven el problema a través de un algoritmo heurístico que dicta la secuencia en la que los vehículos deben visitar a los clientes en relación con la información suministrada; [7] afronta el problema con cross-docking simulando un caso real y utiliza la programación lineal mixta para su solución.

Este documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: Introducción, metodología de la revisión del estado del arte, clasificación de las variantes del problema, métodos de solución, definición del problema, líneas de investigación, tendencias futuras y conclusiones.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este documento se efectúa el siguiente procedimiento con el fin de realizar el estado del arte del problema de ruteo abierto de vehículos:

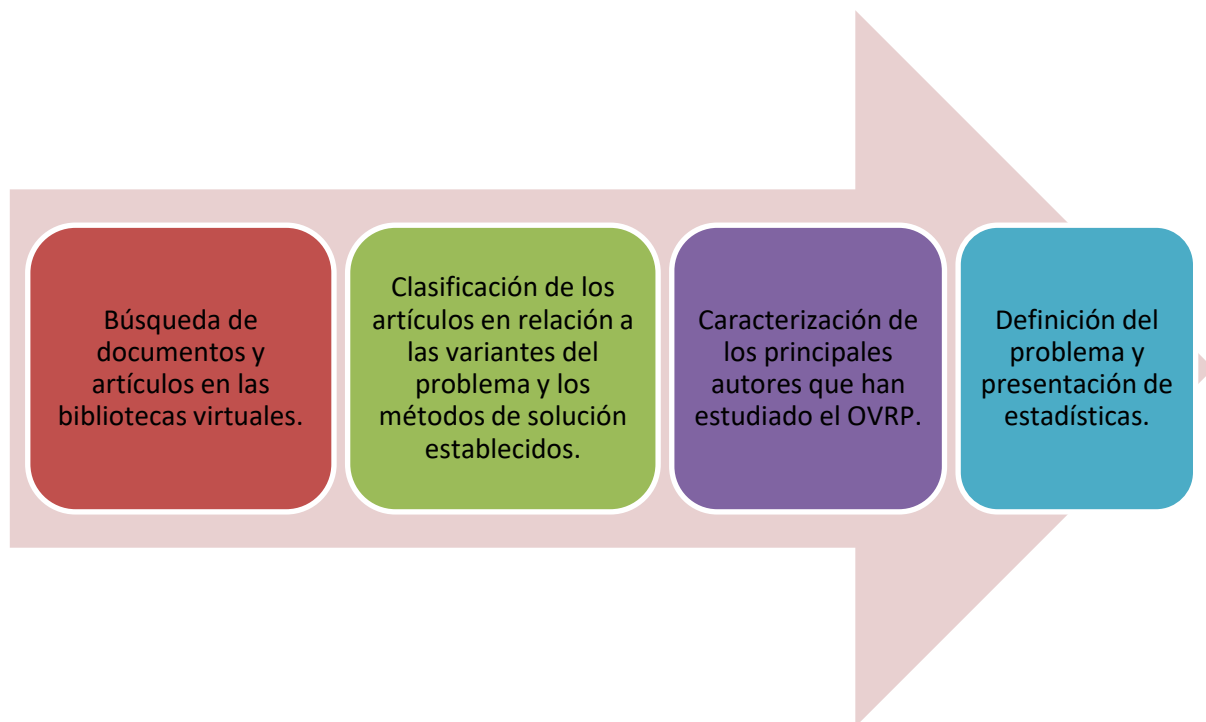


Figura 1. Metodología de la investigación realizada.

2.1. BÚSQUEDA EN BIBLIOTECAS VIRTUALES

Para la selección de documentos se realiza la búsqueda en las bibliotecas virtuales anteriormente nombradas y se encontraron los resultados asociados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Definición de bibliotecas virtuales.

Búsqueda Realizada	Bibliotecas/ Cantidad Documentos Encontrados		
	Scopus	Science Direct	Google Scholar
"OVRP"	<u>48</u>	<u>65</u>	<u>79</u>
"Open Vehicle Routing Problem"	<u>108</u>	<u>89</u>	<u>112</u>

Para continuar con el proceso, se consideró una muestra de 49 artículos publicados hasta 2017 en las bibliotecas virtuales que tratan el OVRP. La selección se realiza teniendo en cuenta los estudios y trabajos más relevantes para obtener información específica del estado del arte del problema en cuestión.

2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES VARIANTES DEL PROBLEMA OVRP Y SUS MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Durante la realización del estudio bibliográfico, se realizó una clasificación general de las variantes del problema de ruteo abierto, los trabajos seleccionados tienen enfoques muy similares y utilizan bases anteriores para ampliar los resultados, por ende se plantea la clasificación basados en dos aspectos fundamentales: cantidad de depósitos y capacidad, como se aprecia en la siguiente figura:

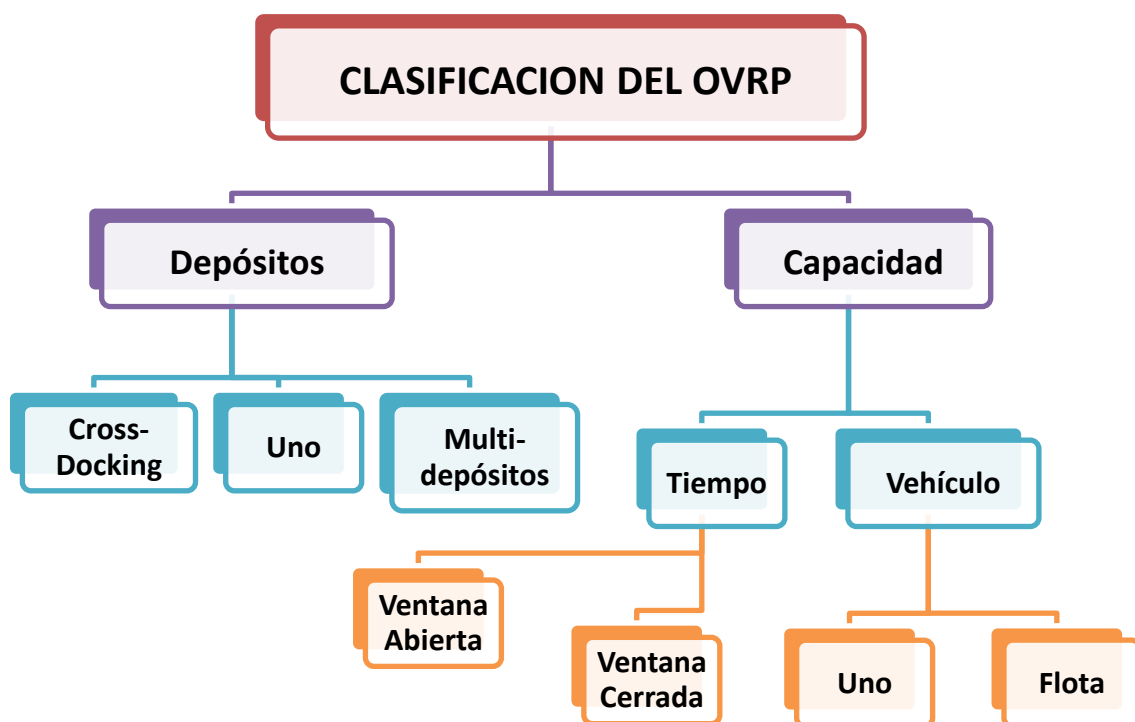


Figura 2. Esquema de clasificación del Problema de ruteo abierto.

Los **depósitos** tiene tres subcategorías: *Un Depósito*, es el modelo de investigación más utilizado en la bibliografía, puesto que en la vida real generalmente las compañías de entrega de productos o mercancías, tienen un único depósito de donde parten sus vehículos repartidores.

Multi-depósitos (MDOVRP), es un tipo de problema que se establece como híbrido puesto que los vehículos al finalizar la entrega de las mercancías deben de abastecerse nuevamente de producto, pero en este tipo de problema, el reabastecimiento ocurre en un depósito diferente al de partida, el cual se encuentra ubicado dentro de la ruta óptima de entrega a los clientes, como se plantea en [3].

El problema de ruteo abierto con *Cross-Docking* (OVRPCD), se produce en una red abierta en la que el flujo comienza a partir de un punto de recogida y termina en un punto a través de Cross-dock entregar sin formar bucle. Desde un punto de vista práctico, OVRPCD puede proporcionar una buena referencia para una empresa que está considerando la posibilidad de externalizar sus actividades logísticas a empresas TPL. La siguiente figura representa el OVRPCD: [7]

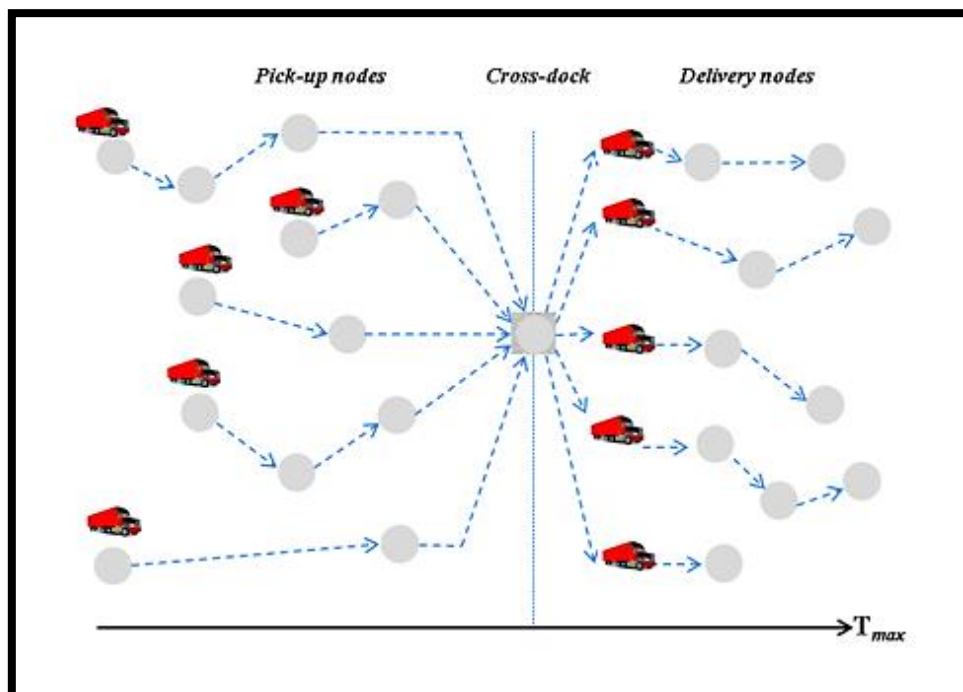


Figura 3. Esquema del OVRP con Cross-Docking (OVRPCD) **Fuente:** Open Vehicle Routing Problem With Cross-Docking [7]

En la **capacidad** encontramos dos subcategorías: *Tiempo*, fundamentado en la capacidad de entrega al cliente en un tiempo límite (ventana cerrada) y cuando el problema no presenta límite de tiempo para efectuar la entrega a los clientes (ventana abierta).

A partir de este tipo de restricción de tiempo, diferentes autores enfocan sus estudios en este aspecto y se define como The Open Vehicle Routing Problem With Time Windows (OVRPTW). [11] Se propone un sistema de Colonia de Hormigas (AC) para resolver el planteamiento, en una cantidad razonable de tiempo con el objetivo de minimizar los costos de transporte en función de la distancia de recorrido total y el número de vehículos en uso.

La siguiente subcategoría es: *Vehículo*, se relaciona con la capacidad de carga neta de esté para realizar las entregas (COVRP), varía en función del tamaño, peso, tipo de embalaje que requiera el producto a entregar y se fundamenta si es un único vehículo o una flota; en [20] se establece un algoritmo Branch-and-Cut para su solución.

2.2.1. VARIANTES DEL OVRP

A lo largo del periodo entre 2000 y 2017 se desarrollaron múltiples artículos del OVRP enfocados en sus variantes ya asociadas anteriormente. Con el pasar de los años el objetivo de los autores ha sido mejorar las primeras investigaciones y aplicar el problema de ruteo abierto a situaciones reales de trabajo. También encontramos variantes con menos estudio pero con planteamientos relevantes:

- Li et al. [32] incorpora el problema de ruteo abierto con flota fija heterogénea (HFFOVRP), en la que las demandas de los clientes se cumplen por una flota de número fijo de vehículos con varias capacidades y los costos relacionados. Por otra parte, los vehículos comienzan en la estación y terminan en uno de los clientes. Este problema es una variante importante del problema de rutas para vehículos clásicos y puede cubrir situaciones más prácticas en el transporte y la logística. Su solución se ejecuta a través de una metaheurística de programación de memoria adaptativa con el algoritmo de búsqueda tabú modificado.

- En [25] y [27] encontramos el problema de ruteo abierto con demanda difusa (OVRPFD), el cual está diseñado sobre la base de la teoría de la credibilidad difusa, la simulación estocástica y un algoritmo mejorado de evolución diferencial; los cuales se integran con el fin de utilizar un algoritmo inteligente híbrido para resolver este tipo de problemas.
- Duan en [33] y [38] intenta solucionar los problemas de ruteo abierto de vehículos con ventanas de tiempo blandos (OVRPSTW / IOVRPSTW); es un tipo común de OVRP con ventanas de tiempo. En estos trabajos, el modelo de la cuestión está construido. Un algoritmo genético mejorado (IGA) está diseñado para resolver la cuestión. Los nodos de referencia se ponen a prueba, y los resultados obtenidos por IGA muestran que el modelo es correcto y es altamente eficiente en el rendimiento computacional.
- El OVRP-D aparece en [18] siendo el mismo problema de ruteo abierto con nodos controladores.
- En [46] se estudia por primera vez el ruteo abierto de vehículos teniendo en cuenta la incertidumbre de la demanda en cada cliente, los autores lo nombraron el (ROVRP). El objetivo principal del trabajo es proponer las estrategias sólidas eficaces e investigar los efectos de la incertidumbre de la demanda en los costos de transporte y las demandas insatisfechas, el método de solución que satisface el planteamiento es un algoritmo de evolución diferencial mejorado.
- [47] tiene como objetivo resolver un problema del mundo real propuesto por una empresa internacional que opera en España y modelado como una variante del ruteo abierto de vehículos en el que el Makespan, es decir, el tiempo máximo de permanencia en el vehículo por una sola persona, debe ser minimizado; se denomina (BOVRP). Se propone un algoritmo competitivo de entradas múltiples, capaz de obtener soluciones de alta calidad en tiempo de cálculo razonable. La eficacia del algoritmo se analiza a través de pruebas de cálculo en un conjunto de 19 autobuses.

- [62] describe el Problema de Enrutamiento del Vehículo Mixto abierto – cerrado (COMVRP). Esta variante difiere de los problemas clásicos de enrutamiento de vehículos porque simultáneamente se consideran rutas abiertas y cerradas en la solución del problema. El objetivo del problema es minimizar los costos fijos y variables para operar las rutas abiertas y cerradas.
- En [65] el documento presenta el problema de ruta de ubicación abierta (OLRP) que es una variante del problema de encaminamiento de ubicación capacitado (CLRP). OLRP está motivado por el aumento en la contratación con empresas de logística de terceros (TPL) y es diferente de CLRP en que los vehículos no regresan al centro de distribución después de atender a todos los clientes. El objetivo de OLRP es minimizar el costo total, que consiste en costos de operación de la instalación, costos fijos del vehículo y costos de viaje. Se propone una heurística simulada de recorrido (SA) para resolver OLRP; el cual se ha adoptado a partir de tres conjuntos de casos de referencia bien conocidos de CLRP con hasta 318 clientes y 4 depósitos potenciales. Los resultados computacionales indican que la heurística propuesta resuelve eficientemente la OLRP.
- Sin duda las constantes mejoras informáticas que abarco este periodo trajo consigo mejores resultados y facilidades para los investigadores plantear y resolver sus modelos matemáticos, sabiendo que los problemas de VRP / OVRP son de tipo MILP (programación lineal entera mixta) que involucra cantidades enteras y continuas, y que resulta ser NP-Hard en problemas con un número mediano o grande de clientes.

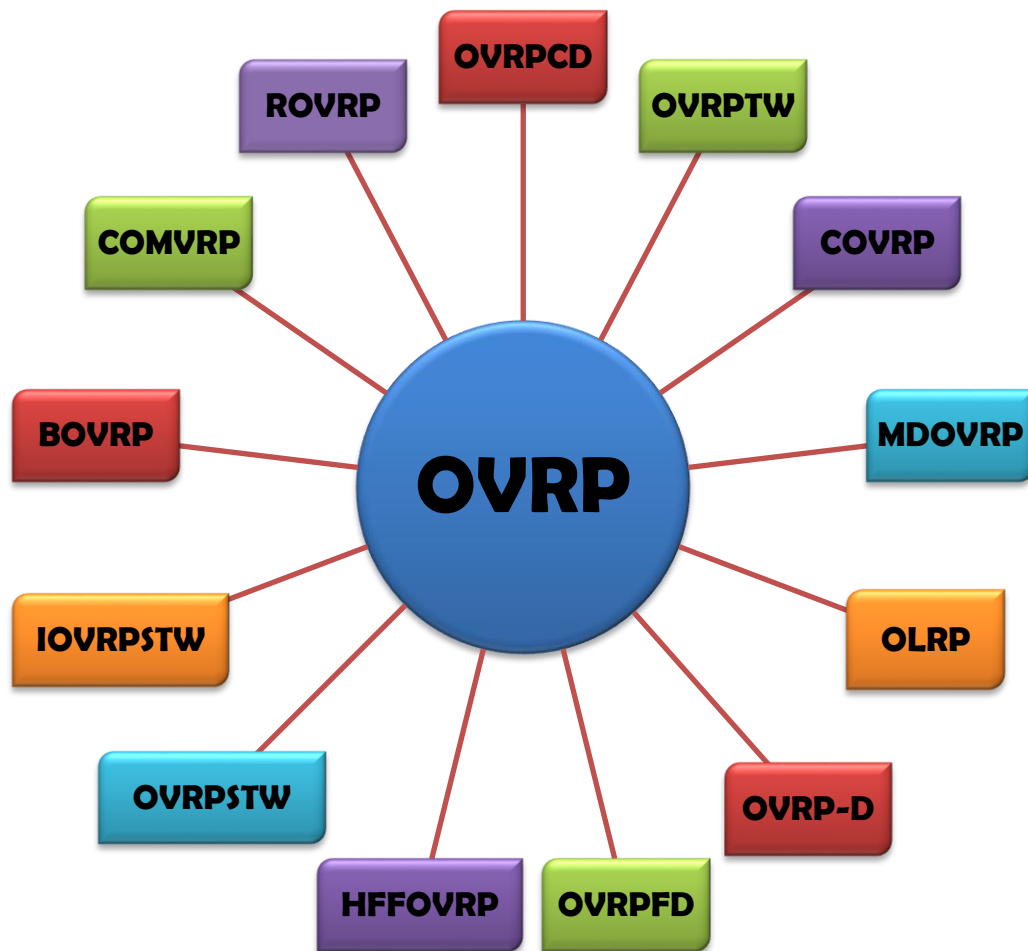


Figura 4. Variantes relevantes adoptadas por el OVRP.

2.2.2. MÉTODOS DE SOLUCIÓN

Para un manejo adecuado de las siglas, a continuación se relacionan las abreviaturas utilizadas en este artículo para los métodos de solución:

- **Métodos exactos (ME):** Algoritmo Branch & Cut: AB&C [20]; Técnicas de programación lineal enteras: ILP [41] [62] [63]; Programación entera mixta: PEM [54].
- **Heurísticas:** Búsqueda tabú: TS [4]; Problema de árbol de expansión mínimo: MSTP [13]; Búsqueda tabú con reasignación de nodos al azar: TS-FFH [14];

Algoritmo de mejora general de inserción: AGENI [16]; Búsqueda tabú con nodos controladores: TS-CN [18]; Algoritmo genético mejorado: IGA [12] - [33]; Algoritmo mejorado: AVNS [19]; Algoritmo simulado: AS [7]; Algoritmo CH para reposición de carga: ACHR [21]; Algoritmo colonia de hormigas: ACS [24]; Algoritmo PSO: APSO [34]; Algoritmo Clarke Wright: ACW [36]; Algoritmo genético: GA [38]; Algoritmo de evolución diferencial mejorado: AIDE [46]; Algoritmo competitivo de entradas múltiples: ACME [47]; Modelo matemático computacional CPLEX: MMC [49]; Algoritmo genético de asignación: AGA [50]; Algoritmo competitivo imperialista: ICA [51]; heurística de búsqueda de vecindad variable: VNS [51]; Heurística simulada de recorrido: HSSA [65].

- **Metaheurísticas M:** Búsqueda tabú bajo el principio de Kernel: TS-Kernel [17]; Metaheurística BoneRoute: MBR [9]; Metaheurística Búsqueda tabú: MTS [22]; Algoritmo híbrido de iteración: AIVND [23]; Algoritmo de selección clonal: ACS [26]; Búsqueda tabú de complejidad computacional: TS-CC [28]; Algoritmo cuántico combinado: AECC [29]; Búsqueda tabú con algoritmo genético de computación paralela: GA-TS [31]; Búsqueda tabú con memoria adaptativa: TS-AD [32]; Búsqueda tabú mejorada: TS-M [35]; Algoritmo compuesto de barrido, de inserción, de intercambio, y 2-Opt: SISEC [45]; Algoritmo combinatorio, emulador de la gravedad para búsqueda local: GELS [48]; Modelo matemático meta-heurístico basado en la simulación un Algoritmo de cercanía: MMCD [60].
- **Métodos híbridos MH:** Algoritmo colonia de hormigas híbrido: ACHH [15]; Algoritmo híbrido de solución estocástica: AHSE [25]; Híbrido diploide de optimización por enjambre de partículas con evolución diferencial: DHPD [37]; Algoritmo de evolución diferencial: AED [27]; Algoritmo genético híbrido: AGH [30]; Algoritmo genético híbrido de búsqueda local: GAH [39]; Algoritmo híbrido inteligente: AHÍ [40]; Algoritmo genético híbrido Spectrum: GAHS [42]; Algoritmo de carácter constructivo de gran capacidad: ACO [44]; Búsqueda tabú multiple: MNS-TS [43].

Tabla 2. Clasificación de los artículos según variante del OVRP y métodos de solución

CLASIFICACIÓN SEGÚN VARIANTE DEL OVRP Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN			
Autores	Variante OVRP	Método	Referencia / año
Sariklins & Powell.	OVRP	MSTP	[13] / 2000
Jose Brandão.	OVRP	TS	[4] / 2004
Tarantilis, Diakoulaki, & Kiranoudis.	OVRP	MBR	[9] / 2004
Fu et al.	OVRP	TS-FFH	[14] / 2005
Li et al.	OVRP	ACHH	[15] / 2006
Wang et al.	OVRP	AGENI	[16] / 2006
Zhong & Du.	OVRP	TS-Kernel	[17] / 2007
Repoussis et al.	OVRPTW	IGA	[12] / 2007
Aksen et al.	OVRP-D	TS-CN	[18] / 2007
Letchford et al.	COVRP	AB&C	[20] / 2006
Li & Liu.	MDOVRP	ACHR	[21] / 2008
Robert Russell et al.	OVRPTW	MTS	[22] / 2008
Choomlucksana et al.	OVRPTW	ACS	[24] / 2008
Cheng et al.	OVRP	AIVND	[23] / 2008
Peng.	OVRPFD	AHSE	[25] / 2009
Pan & Fu.	OVRP	ACS	[26] / 2009
Erbao Cao et al.	OVRPFD	AED	[27] / 2010
Zarachidis & Koranoudis.	OVRP	TS-CC	[28] / 2010
Zhao et al.	OVRP	AECC	[29] / 2010
Hu & Wu.	OVRP	DHPD	[37] / 2010
Ge et al.	OVRP	AHI	[40] / 2010
Brito, et al.	OVRPTW	ACO	[44] / 2015
Yu, Jewpanya & Redi.	OVRPCD	AS	[7] / 2016
Ruiz, Expósito et al.	MDOVRP	MMC	[49] / 2016
Soto, Sevaux, et al.	MDOVRP	MNS-TS	[43] / 2017
Hossenabadi et al.	OVRP	GELS	[48] / 2016
V. F. Yu, S. Y. Lin	OLRP	HSSA	[65] / 2015
M. Alinaghian et al.	OVRPCD	MMCD	[60] / 2016
Ran Liu & Zhibin Jiang	COMVRP	ILP	[62] / 2012
Salari, Toth & Tramontani.	OVRP	ILP	[41] / 2010
Ren C.	OVRP	GAH	[30] / 2011
Yu, Ding & Zhu.	OVRP	GA-TS	[31] / 2011
Li, Leung & Tian.	HFFOVRP	TS-AD	[32] / 2012

CLASIFICACIÓN SEGÚN VARIANTE DEL OVRP Y MÉTODOS DE SOLUCIÓN			
Autores	Variante OVRP	Método	Referencia / año
Duan F.	OVRPSTW	IGA	[33] / 2012
Duan & He.	IOVRPSTW	GA	[38] / 2010
MirHassani & Abolghasemi.	OVRP	APSO	[34] / 2011
Ge, Xiomg & Wang.	OVRPSTW	TSM	[35] / 2012
Pichpibul & Kawtummachai.	OVRP	ACW	[36] / 2013
E. Lalla et al.	MDOVRP	ILP	[63] / 2015
Li, G.	OVRPTW	PEM	[54] / 2009
Redi et al.	OVRPTW	AVNS	[19] / 2014
Yilmaz et al.	OVRP	GAH	[39] / 2014
Lui, Jiang & Geng.	MDOVRP	GAHS	[42] / 2014
K. Fleszar et al.	OVRP	VNS	[64] / 2009
Majid et al.	HFFOVRP	SISEC	[45] / 2016
Cao, Lai & Yang.	ROVRP	AIDE	[46] / 2014
López, Hernández, Vigo et al.	BOVRP	ACME	[47] / 2014
Shamshirband et al.	OVRP	ICA	[51] / 2015
Wang, Zhan, Zhang.	MDOVRP / OVRPTW	AGA	[50] / 2015

A continuación se presentan algunas estadísticas obtenidas de la tabla 2, a cerca de los sobre los 49 artículos evaluados en el periodo:

Variantes Del Problema.

La variante más estudiada por los autores en las investigaciones es el OVRP tradicional con 22 artículos, seguido del OVRP con ventanas de tiempo con 10 articulos. MDOVRP con 5. OVRPCD con 3. OVRPFD, y HFFOVRP fueron propuestas por 2 autores respectivamente. Algunas como el COVRP, OVRP-D, ROVRP, BOVRP, OLRP, COMVRP, solo cuentan con un artículo de estudio en la revisión

Métodos de Solución.

- ✓ Para las metaheurísticas el método de solución más utilizado fue la Búsqueda tabú (TS) con una serie de variaciones en relación con el estudio aplicado.
- ✓ En el estudio solo se utilizaron tres métodos exactos de solución [20], [41], [54].
- ✓ El algoritmo de colonia de hormigas fue utilizado para los métodos heurísticos, metaheurísticos e híbridos.
- ✓ Los algoritmos genéticos se implementaron como solución en los diferentes métodos, [12], [30], [31], [33], [38], [39], [42], [50].

Los autores de [6] proponen un método heurístico clásico para resolver un OVRP simétrico que no incluye restricciones máximos de longitud de ruta. En la primera fase del algoritmo sus clientes se asignan a grupos. Esta fase incluye la formación de los grupos iniciales, así como el equilibrio de los racimos reasignando aquellos clientes que se agregan últimos a sus respectivos grupos. En la segunda fase, se considera el sub-problema de enrutamiento que se basa en la generación de mínimo probablemente no factible que abarca soluciones de árboles y convertirlos en los ejecutables.

Tarantilis y Kiranoudis en [8] consideran un problema de distribución de carne fresca de la vida real y formularla como un multi-depósito de OVRP. El problema se resuelve mediante un método metaheurístico se hace referencia como umbral aceptar algoritmo basado en lista (LBTA) en la que los valores de umbral usados en la aceptación o rechazo de las nuevas soluciones son generados por las características de la espacio de solución del problema y se almacenan en una lista.

Seguidamente en [9] proponen un sistema de soporte de decisiones para resolver el OVRP que emplea un algoritmo llamado metaheurístico BoneRoute, esté se basa en el concepto de memoria adaptativa introducido por primera Rochat y Taillard para resolver el VRP. En esta técnica, una piscina de soluciones OVRP se almacena en una memoria de adaptación que se actualiza dinámicamente durante el procedimiento. Las secuencias de nodos que se hace referencia como “huesos” se extraen periódicamente desde la piscina de las soluciones en la memoria adaptativa y se utilizan para producir nuevas soluciones.

Brandão en [10] también estudia el OVRP con la longitud y la capacidad máxima de la ruta y lo resuelve mediante un algoritmo de búsqueda tabú en el que las soluciones vecinales son generadas por inserción y de intercambio movimientos. La característica más notable del algoritmo es el concepto de oscilación estratégica que permite a la aceptación de las soluciones no factibles como nuevas soluciones. Esto se hace multiplicando la carga total del exceso de vehículos y el total de horas extraordinarias de rutas por un parámetro de penalización y poner estos términos en la función objetivo.

El artículo [23] tiene un gran planteamiento que tiene como objetivo diseñar un conjunto de rutas de vehículos abiertos con el menor número de vehículos posible y el más corto tiempo total de viaje, para servir a un conjunto de clientes distribuidos geográficamente con coordenadas conocidas y demandas. En este trabajo, un nuevo híbrido iterado se propone locales IVND algoritmo de búsqueda para resolver el OVRP. El IVND integra un procedimiento de descenso barrio variable (VND) en el marco de la búsqueda local iterativa (ILS). Una estrategia de perturbación está diseñada para ayudar al proceso de búsqueda de salto de los óptimos locales. Los resultados computacionales sobre 16 casos de problemas de referencia muestran que el algoritmo propuesto puede encontrar las mejores soluciones conocidas para la mayoría de los problemas dentro de un corto período de tiempo, lo que indica que el algoritmo metaheurístico híbrido propuesto es competitivo con otras heurísticas el estado de la técnica para resolver la OVRP en términos de calidad de la solución y la eficiencia.

Yu, S; diseña y plantea en [31] la solución de un ruteo abierto de vehículo mediante la aplicación de un nuevo algoritmo genético híbrido y la búsqueda Tabú (GA-TS), que combina la computación paralela de la GA y la optimización global con la habilidad de búsqueda Tabú. En primer lugar, el algoritmo propuesto utiliza número natural de codificación de acuerdo con las demandas de los clientes y la cautividad del vehículo para la optimización del globo. En segundo lugar, los individuos de la población hacen TS búsqueda local con un cierto grado de probabilidad, es decir, hacer la optimización de enrutamiento local de todos los sitios de los clientes pertenece a un vehículo. El mecanismo no sólo mejora la capacidad de optimización

global, sino que también garantiza la velocidad de operación. El algoritmo se utilizó en la mina de carbón Zhengzhou.

Bodin et al [53]. Describe el OVRP en FedEx, como rutas incompletas de entrega para aviones. Un avión deja Memphis, hace varias entregas en varias ciudades pero no regresa a Memphis. El avión llega a la última ciudad de la ruta de entrega y recoge entregas de esa ciudad. El autor describe una variante de algoritmos de Clarke y Wright que es usada por FedEx para desarrollar una ruta abierta para cada avión.

Actualmente las experiencias FedEx del OVRP solo hacen entrega a domicilio en las residencias de sus clientes. FedEx contrata correos con vehículos que cada mañana llevan los paquetes al depósito de FedEx y de allí reparten a las residencias. Los correos y los vehículos no regresan al depósito de FedEx después de terminar la entrega de los paquetes del día. Según [52] el OVRP también se encuentra presente en las empresas de entrega de periódico a domicilio, pero presenta problemas. Un repartidor de correo es subcontratado por la empresa de periódico para hacer entrega del periódico en las residencias de los clientes. La empresa de periódico solo se preocupa por la ruta de la última entrega, después de ese punto es un repartidor de periódico que no se compensa (que no se paga).

Un tema común cuando el problema de ruta se ajusta al marco OVRP es el modelo de compensación. Moldeando y resolviendo el problema de las rutas de vehículo en el mundo real, Levy [52] ha observado que si una compañía no está pagando después de la última entrega, entonces quiere una ruta eficiente y no se preocupa por el regreso al depósito o a la bodega. A menudo esto se encuentra en la práctica cuando las entregas son hechas por contratistas que no son empleados de la compañía. Los contratistas tienen sus propios vehículos y pagan sus propios gastos de los vehículos, y tienen un modelo de compensación basado en el kilometraje. La compañía no necesita el contratista ni el vehículo de vuelta en el depósito; de hecho si el modelo de compensación que se usa es por kilometraje, la compañía va a querer una ruta que no esté influenciada por el regreso al depósito, debido a que sería un kilometraje extra al modelo de compensación.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La tabla 2, refleja la gran cantidad de variables que ostenta el OVRP, por ende se decide establecer en este documento el modelo matemático de programación entera mixta del OVRPTW que propone el autor de [54]. El objetivo de la solución es minimizar la distancia de recorrido total (conjunto óptimo de rutas) y reducir al mínimo el número total de los vehículos.

Parámetros del modelo.

- a. Cada vehículo tiene un recipiente con una limitación física para que la carga total de cada vehículo no puede exceder su capacidad q .
- b. Cada vehículo tiene limitaciones de distancia máxima de modo que la distancia total recorrida por cada vehículo no puede exceder L .
- c. Se le asignará un vehículo para sólo una ruta en la que puede haber más de un cliente.
- d. Un cliente será visitado por un solo vehículo.
- e. Cada ruta se inicia en la estación de distribución (0) y termina en el último cliente.
- f. La demanda de cada cliente es d_i ($i = 1, 2, \dots, n$) and $\max d_i \leq q$.
- g. La distancia entre el cliente i y el cliente j es C_{ij} .
- h. Hay K vehículos en el almacén de distribución.
- i. Cada cliente debe recibir servicio dentro de intervalo de tiempo especificado (ventana de tiempo) $[a_i, b_i]$.
- j. El más bajo a_i y los límites superiores b_i de la ventana de tiempo, definen el tiempo más temprano y más reciente para el inicio del servicio al cliente, un vehículo que no está permitido para iniciar el servicio en una ubicación del cliente después de b_i . Por otra parte, un tiempo de espera que se incurre si un vehículo llega a un cliente antes a_i .

- k. Cada cliente también tiene un tiempo de servicio t_i especificado que es el tiempo empleado por el vehículo para cargar y descargar la mercancía. Por lo tanto, el tiempo total de la ruta de un vehículo es: la suma del tiempo de viaje (que es proporcional a la distancia recorrida), la hora y el tiempo de servicio en espera.
- l. El conjunto de vehículos es: $V = \{1, 2, \dots, K\}$; El conjunto de clientes es: $C = \{1, 2, \dots, n\}$.
- m. La variable de decisión es $x_{ijk} = 1$. n caso de arco (i, j) pertenece a la ruta operado por vehículo K , si no es 0.

A continuación se plantea el modelo y sus restricciones:

- ✓ La función **(1)** reduce al mínimo número total de vehículos.
- ✓ Función **(2)** minimiza la distancia de recorrido total.
- ✓ Restricción **(3)** asegura que cada cliente recibe la visita de exactamente un vehículo.
- ✓ Restricción **(4)** garantiza que la cantidad de distribución de cada vehículo no más sea más de su capacidad.
- ✓ Restricciones **(5)** definen que como máximo se utilizan K vehículos.
- ✓ Restricción **(6)** garantiza que el mismo vehículo llega y sale de cada cliente que sirve.
- ✓ Las restricciones **(7)** y **(8)** son las limitaciones de tiempo de las ventanas.
- ✓ La restricción **(9)** es la restricción máxima distancia, L es el límite superior de la carga total transportada por un vehículo en cualquier sección dada de la ruta.
- ✓ la restricción **(10)** define la naturaleza de la variable de decisión.

Modelo Matemático.

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} x_{0jk} \quad (1)$$

$$\min \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ijk} \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1, \forall i \in C \quad (3)$$

$$\sum_{i \in C} d_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq q, \forall k \in V \quad (4)$$

$$\sum_{j \in C} x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in V \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihk} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0 \quad \forall k \in V \forall h \in C \quad (6)$$

$$s_{ik} + T_i + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}) \leq s_{jk} \quad \forall k \in V, \forall i, j \in N \quad (7)$$

$$a_i \leq s_{ik} \leq b_i, \forall k \in V \forall i \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} d_{ij} x_{ijk} \leq L \quad \forall k \in V \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in V, \forall i, j \in N \quad (10)$$

4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Cada variante del OVRP trae consigo la posibilidad de establecerse como una nueva línea de investigación, ya que sirve como abre bocas a nuevas cuestiones de mejora. A continuación se presentan una serie de líneas de investigación que fueron halladas en el estudio bibliográfico de los artículos recientes, publicados entre 2014 y 2017:

Un nuevo enfoque para abrir rutas para el problema de vehículos con la ventana de tiempo teniendo en cuenta la antigüedad del vehículo y el valor monetario [58]; OVRP con ventanas de tiempo blandas a base de impuesto sobre el carbono [56]; búsqueda local, búsqueda tabú y expulsión múltiples cadenas para el vehículo abierto problema de enrutamiento Multi-depósito [43]; Solución del OVRP de flota fija heterogénea mediante un algoritmo metaheurístico combinado [57]; Solución de problemas de ruteo abierto usando el algoritmo de búsqueda local de emulación gravitatoria [48]; Estudio sobre una Multi-estación y flota heterogénea del OVRP para reducir el consumo de combustible [59]; problema de optimización combinatoria que puede utilizar una flota homogénea de los vehículos [51].

Estas líneas de investigación pueden hacerse extensivas a vehículos homogéneos y heterogéneos, con un único depósito y Multi-depósito, incorporando variables de efecto ambiental. [55]

5. CONCLUSIONES Y TENDENCIAS FUTURAS

- La realización de este artículo demuestra sin duda el crecimiento acelerado del problema de ruteo abierto de vehículos en el nuevo siglo; el OVRP es una herramienta clave para las organizaciones que prestan servicios logísticos de entregas y que puede ser adaptado a diferentes aplicaciones en las industrias. Gran porcentaje de los artículos estudiados en la revisión bibliográfica, son adaptaciones de situaciones reales.
- Este artículo muestra una clasificación del OVRPD según sus variantes y métodos de solución aplicados. La inclusión de nuevos componentes al problema clásico, aumenta la complejidad y a su vez obliga a los autores a desarrollar nuevos métodos de solución heurísticos, metaheurístico o híbridos.
- Los nuevos modelos propuestos para el OVRP deben enfocar sus estudios en el cross-Docking, sin duda una variante que concuerda con las situaciones actuales de desarrollo de los depósitos de productos.
- Sin duda el OVRP es la variante de los problemas de ruteo que se encuentra en auge, puesto que las empresas prefieren subcontratar vehículos para sus entregas ya que esto disminuye la inversión en activos fijos que tienden a tener una alta depreciación.
- Las herramientas informáticas cumplen un papel fundamental para el desarrollo de este tipo de problemas, su constante actualización trae consigo facilidades para la solución de estos algoritmos.
- Los estados del arte permiten reunir el proceso evolutivo del tema tratado, valiendo como herramienta a los nuevos investigadores para compilar y sistematizar información en pro de nuevos estudios y exploraciones..

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Schrage L. Formulation and structure of more complex/realistic routing and scheduling problems. *Networks* 1981; 11:229–32.
- [2] Bodin L, Golden B, Assad A, Ball M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & Operations Research* 1983; 10:63–211.
- [3] Li, Y.-H. , Liu, X. Modelling and its ant colony algorithm for multi-depot open vehicle routing problem with replenishment on the way. *Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS* 14(3), pp. 557-562.
- [4] Brandão J. A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research* 2004; 157:552–64.
- [5] Fu, Z. Eglese, R. Li, L. A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problema. *European Journal of the Operational Research Society.* 56(3), pp. 267-274
- [6] Sariklis D, Powell S. A heuristic method for the open vehicle routing problem. *European Journal of the Operational Research Society.*51, pp. 564–573.
- [7] Yu, V.F., Jewpanya, P., Redi, A.A.N.P. Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers and Industrial Engineering* 94, pp. 6-17.
- [8] Tarantilis CD, Kiranoudis CT. Distribution of fresh meat. *J Food Eng* 51: 85–91. (2002).
- [9] Tarantilis CD, Diakoulaki D, Kiranoudis CT. Combination of geographical information system and efficient routing algorithms for real life distribution operations. *European Journal of the Operational Research Society* 2004.152, pp: 437–453.
- [10] Brandão, J. A tabu search heuristic algorithm for open vehicle routing problem. *European Journal of the Operational Research Society* 2004.157, pp: 552–564.
- [11] Choomlucksana, J. Park, S. Lee, S. An ant colony system for open vehicle routing problems withtime Windows. *IIE Annual Conference and Expo* 2008 pp. 1562-1567.

- [12]** Repoussis, P.P. Tarantilis, C.D. Ioannou, G. The open vehicle routing problem with time Windows. *Journal of the Operational Research Society* 2007. 58(3), pp. 355-367.
- [13]** Sariklis D, Powell S. A heuristic method for the open vehicle routing problem. *European Journal of the Operational Research Society* 2000. 51: 564–573.
- [14]** Fu Z, Eglese R, Li L. A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society* 2005; 56:267–74.
- [15]** Li, X. Tian, P. An ant colony system for the open vehicle routing problema. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 2006. 4150 LNCS, pp. 356-363
- [16]** Wang, W. Wu, B. Zhao, Y. Feng, D. Particle swarm optimization for Open Vehicle Routing Problem. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* 2006. 4114 LNAI - II, pp. 999-1007.
- [17]** Zhong, S.-Q. Du, G. Open vehicle routing problem based on kernel route tabu search algorithm. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS* 2007. 13(4), pp. 827-832.
- [18]** Aksen, D. Özyurt, Z. Aras, N. Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines. *Journal of the Operational Research Society*. 2007. 58(9), pp. 1223-1234.
- [19]** Redi, A.A.N.P. Maghfiroh, M.F.N. Yu, V.F. An improved variable neighborhood search for the open vehicle routing problem with time Windows. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. 2014. 6962688, pp. 1641-1645.
- [20]** Letchford, A.N. Lysgaard, J. Eglese, R.W. A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problema. *Journal of the Operational Research Society*. 2006. 58(12), pp. 1642-1651.

- [21]** Li, Y. H. Liu, X. Modelling and its ant colony algorithm for multi-depot open vehicle routing problem with replenishment on the way. *Jisuanji Jicheng Zhizao Xitong/Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS*. 2008. 14(3), pp. 557-562.
- [22]** Russell, R. Chiang, W.-C. Zepeda, D. Integrating multi-product production and distribution in newspaper logistics. *Computers and Operations Research*. 2008. 35(5), pp. 1576-1588.
- [23]** Chen, P. Huang, H. Dong, X. A new hybrid iterated local search for the open vehicle routing problema. *Proceedings - 2008 Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application, PACIIA 2008*. 1,4756688, pp. 891-895.
- [24]** Choomlucksana, J. Park, S. Lee, S. An ant colony system for open vehicle routing problems withtime Windows. *IIE Annual Conference and Expo 2008*. pp. 1562-1567.
- [25]** Peng, B.-Q. An improved differential evolution algorithm for open vehicle routing problem with fuzzy demand. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao/Journal of Wuhan University of Technology*. 2009. 31(9), pp. 75-79+83.
- [26]** Pan, L. Fu, Z. A clonal selection algorithm for open vehicle routing problema. *3rd International Conference on Genetic and Evolutionary Computing, WGEC 2009*. 5402827, pp. 786-790.
- [27]** Cao, E. Lai, M. The open vehicle routing problem with fuzzy demands. *Expert Systems with Applications*. 2010. 37(3), pp. 2405-2411.
- [28]** Zachariadis, E.E. Kiranoudis, C.T. An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods. *Computers and Operations Research*. 2010. 37(4), pp. 712-723.
- [29]** Zhao, Y.W. Zhang, J.L. Peng, D.J. Open vehicle routing problem using quantum evolutionary algorithm. *Advanced Materials Research*. 2010. 102-104, pp. 807-812.

- [30]** Ren, C. Research on single and mixed fleet strategy for open vehicle routing problema. *Journal of Software* 2011. 6(10), pp. 2076-2081.
- [31]** Yu, S. Ding, C. Zhu, K. A hybrid GA-TS algorithm for open vehicle routing optimization of coal mines material. *Expert Systems with Applications*. 2011. 38(8), pp. 10568-10573.
- [32]** Li, X. Leung, S.C.H. Tian, P. A multistart adaptive memory-based tabu search algorithm for the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*. 2012. 39(1), pp. 365-374.
- [33]** Duan, F. OVRPSTW and its improved genetic algorithm. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. 2012. 117 AISC(127 VOL. 2), pp. 249-255.
- [34]** Mirhassani, S.A. Abolghasemi, N. A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problema. *Expert Systems with Applications*. 2011. 38(9), pp. 11547-11551.
- [35]** Ge, J. Xiomg, Y. Wang, H. An improved TS for the open vehicle routing problem with soft time Windows. *Proceedings - 2012 5th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2012*. 1,6407000, pp. 382-385.
- [36]** Pichpibul, T. Kawtummachai, R. A heuristic approach based on Clarke-Wright algorithm for open vehicle routing problema. *The Scientific World Journal*. 2013.
- [37]** Hu, F. Wu, F. Diploid hybrid particle swarm optimization with differential evolution for Open Vehicle Routing Problem. *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. 2010. 5554989, pp. 2692-2697.
- [38]** Duan, F. He, X. IOVRPSTW and its improved genetic algorithm. *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2010*. 5645141, pp. 933-936.
- [39]** Yilmaz Eroglu, D. Caglar Gencosman, B. Cavdur, F. Ozmutlu, H.C. Introducing the MCHF/OVRP/SDMP: Multicapacitated/heterogeneous fleet/open vehicle routing problems with split deliveries and multiproducts. *Scientific World Journal*. 2014.

- [40] Ge, H. Zhen, T. Jiang, Y. Che, Y. An intelligent solution for open vehicle routing problem in grain logistics. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2010. pp. 389-396.
- [41] Salari, M. Toth, P. Tramontani, A. An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem. *Computers and Operations Research*. 2010. 37(12), pp. 2106-2120.
- [42] Liu, R. Jiang, Z. Geng, N. Erratum to: A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problema. *OR Spectrum*. 2014. 36(2), pp. 423-424.
- [43] Soto, M. Sevaux, M. Rossi, A. Reinholz, A. Multiple neighborhood search, tabu search and ejection chains for the multi-depot open vehicle routing problema. *Computers and Industrial Engineering*. 2017. 107, pp. 211-222.
- [44] Brito, J. Martínez, F.J. Moreno, J.A. Verdegay, J.L. An ACO hybrid metaheuristic for close-open vehicle routing problems with time windows and fuzzy constraints. *Applied Soft Computing Journal*. 2015. 32, pp. 154-163.
- [45] Yousefikhoshbakht, M. Dolatnejad, A. Didehvar, F. Rahmati, F. A Modified Column Generation to Solve the Heterogeneous Fixed Fleet Open Vehicle Routing Problem. *Journal of Engineering (United States)*. 2016.
- [46] Cao, E. Lai, M. Yang, H. Open vehicle routing problem with demand uncertainty and its robust strategies. *Expert Systems with Applications*. 2014. 41(7), pp. 3569-3575.
- [47] López-Sánchez, AD. Hernández-Díaz, AG. Vigo, D. Caballero, R. Molina, J. A multi-start algorithm for a balanced real-world Open Vehicle Routing Problem. *European Journal of Operational Research*. 2014. 238(1), pp. 104-113.
- [48] Hosseinabadi, A.A.R. Kardgar, M. Shojafar, M. Shamshirband, S. Abraham, A. Gravitational search algorithm to solve open vehicle routing problem. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2016. 424, pp. 93-103.
- [49] Lalla-Ruiz, E. Expósito-Izquierdo, C. Taheripour, S. An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*. 2016. 38, pp. 175-187.

- [50]** Wang, X. Zhan, H. Zhang, J. Research of oil product secondary distribution optimization based on collaborative distribution. *Procedia Computer Science*. 2015. 60(1), pp. 1367-1376.
- [51]** Shamshirband, S. Shojafar, M., Hosseinabadi, A.A.R. Abraham, A. An imperialist-based optimization algorithm for the open vehicle routing problem. *Lecture Notes in Artificial Intelligence (Subseries of Lecture Notes in Computer Science)*. 2015. 9121, pp. 221-233.
- [52]** Levy L. Private communication. RouteSmart Technologies, Inc., 2005.
- [53]** Bodin L, Golden B, Assad A, Ball M. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers & Operations Research* 1983; 10:63–211.
- [54]** Li, G. An improved ant colony algorithm for open vehicle routing problem with time Windows. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2009*. 2,5370068, pp. 616-619.
- [55]** Ballesteros Silva, Pedro Pablo. Escobar Zuluaga, Antonio. Revisión del estado del arte del problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega (VRPPD). *Revista Ingeniería y Desarrollo Volumen 34*, Julio-diciembre, 2016.
- [56]** Duan, F. He, X. Multiple depots incomplete open vehicle routing problem based on carbon tax. *Communications in Computer and Information Science*. 2014. 472, pp. 98-107.
- [57]** Yousefikhoshbakht, M., Didehvar, F., Rahmati, F. Solving the heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem by a combined metaheuristic algorithm. *International Journal of Production Research*. 2014. 52(9), pp. 2565-2575.
- [58]** Masoud Rabbani; Mohammad-sadegh Ziaei; Aschkan Omidvar. A new approach to open vehicle routing problem with time window considering vehicle age and monetary value. *IJS and Operations Management (IJSOM)*, Vol. 20, No. 2, 2015.
- [59]** Zhang, L., Wang, M. Study on a multi-depot and heterogeneous-vehicle open vehicle routing problem to reduce fuel consumption. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. 336-338, pp. 2567-25713.

- [60]** M. Alinaghian, M. R. Kalantari, A. Bozorgi-Amiri, N. G. Raad, A novel mathematical model for cross dock open-close vehicle routing problem with splitting, *International Journal of Mathematical Sciences and Computing (IJMSC)* 2 (3) (2016) 21–31.
- [61]** F. Li, B. Golden, E. Wasil, The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results, *Computers and operations research* 34 (10) (2007) 2918–2930.
- [62]** R. Liu, Z. Jiang, The close-open mixed vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research* 220 (2) (2012) 349–360.
- [63]** E. Lalla-Ruiz, C. Exposito-Izquierdo, S. Taheripour, S. Voß, An improved formulation for the multi-depot open vehicle routing problem, *OR Spectrum* 38 (1) (2016) 175–187.
- [64]** K. Fleszar, I. H. Osman, K. S. Hindi, A variable neighbourhood search algorithm for the open vehicle routing problem, *European Journal of Operational Research* 195 (3) (2009) 803–809.
- [65]** V. F. Yu, S. Y. Lin, A simulated annealing heuristic for the open location-routing problem, *Computers and Operations Research* 62 (2015) 184–196.